



TUGAS AKHIR - TF 141581

***PEMODELAN FOULING PADA HEAT EXCHANGER
MENGUNAKAN PERSAMAAN PHENOMENOLOGICAL NON LINIER***

RAHMATULLOH
NRP 2412 100 110

Dosen Pembimbing
Hendra Cordova, ST, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

***FOULING MODEL OF HEAT EXCHANGER USING EQUATION
PHENOMENOLOGICAL NON LINIER***

***RAHMATULLOH
NRP 2412 100 110***

***Supervisor
Hendra Cordova, ST, MT.***

***DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017***

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : RAHMATULLOH

NRP : 2412100110

Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul *Pemodelan Fouling Pada Heat Exchanger Menggunakan Persamaan Phenomenological Non Linier* adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 31 Juli 2017
Yang membuat pernyataan,

Rahmatulloh

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN *FOULING* PADA *HEAT EXCHANGER* ~~MENG~~GUNAKAN PERSAMAAN *PHENOMENOLOGICAL* NON LINIER

TUGAS AKHIR

Oleh :
Rahmatulloh
NRP : 2412100110

Surabaya, 31 Juli 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Hendra Cordova, ST, MT.
NIPN. 196905301994121001



Kemua Departemen
Teknik Fisiika FTI-ITS
Agus Muhammad Hafid, S.T., M.Si, Ph.D
NIPN. 197809022003121002

LEMBAR PENGESAHAN

PEMODELAN FOULING PADA HEAT EXCHANGER MENGUNAKAN PERSAMAAN PHENOMENOLOGICAL NON LINIER

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada



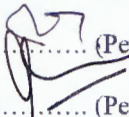
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi dan Kontrol
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

RAHMATULLOH

NRP. 2412100110

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Hendra Cordova, ST, MT.  (Pembimbing 1)
2. Totok Ruki Biyanto, Ph.D.  (Ketua Penguji)
3. Andi Rahmadiansyah, ST, MT  (Penguji 1)
4. Gunawan Nugroho, ST, MT, Ph.D (Penguji 2)

**SURABAYA
JULI, 2017**

**PEMODELAN *FOULING* PADA *HEAT EXCHANGER*
MENGUNAKAN PERSAMAAN *PHENOMENOLOGICAL NON*
*LINIER***

Nama Mahasiswa : Rahmatulloh
NRP : 2412 100 110
Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Hendra Cordova, ST,MT.

Abstrak

Heat exchanger merupakan suatu alat mekanik yang digunakan dalam proses perpindahan panas dua atau lebih fluida yang memiliki temperatur yang berbeda. Namun, dengan adanya *fouling* pada *heat exchanger* membuat perpindahan panas yang terjadi akan mengalami hambatan. Pembentukan lapisan *deposit* akan terus berkembang selama *heat exchanger* dioperasikan. Akumulasi *deposit* pada permukaan *heat exchanger* menimbulkan berkurangnya luas permukaan, sehingga mampu menaikkan *pressure drop* dan menurunkan efisiensi perpindahan panas. Oleh sebab itu dibutuhkan suatu model untuk mengetahui fenomena serta karakteristik dari *fouling*. Dengan konsep Kern dan Seaton mendefinisikan bahwa laju aliran *fouling* berdasarkan pada perbedaan antara massa *fouling* saat *deposit* dengan saat *removal*. Hal ini yang kemudian dijadikan acuan dalam menurunkan persamaan Polley. Setelah mendapatkan model dilakukan validasi untuk mendapatkan nilai terbaik. Dimana dalam menghitung *error* menggunakan RMSE. Nilai *error* yang di hasilkan pada pemodelan *heat exchanger* adalah sebagai berikut HE1102 *error* yang di hasilkan sebesar 0.020, HE1103 *error* yang di hasilkan 0.028, HE1104 *error* yang di hasilkan 0.027

Kata Kunci—*Heat Exchanger, Fouling, Deposit, Pressure Drop*

FOULING MODEL OF HEAT EXCHANGER USING EQUATION PHENOMENOLOGICAL NON-LINEAR

Name : ***Rahmatulloh***
NRP : ***2412 100 110***
Department : ***Engineering Physics FTI-ITS***
Supervisor : ***Hendra Cordova, ST,MT.***

Abstract

Heat exchangers are a mechanical device used in the heat transfer process of two or more fluids having different temperatures. However, with the fouling on the heat exchanger makes the heat transfer that occurs will experience obstacles. The formation of the deposit layer will continue to grow as long as the heat exchanger is operated. The accumulation of deposit on the surface of the heat exchanger results in reduced surface area, thus increasing the pressure drop and decreasing heat transfer efficiency. Therefore we need a model to know the phenomenon and characteristics of fouling. With the concept of Kern and Seaton defining that the fouling flow rate is based on the difference between the fouling mass at the time of the deposit with the time of removal. This is then used as a reference in lowering the Polley equation. After getting the model done validation to get the best value. Where to calculate error using RMSE. The error value generated in heat exchanger modeling is as follows HE1102 error which resulted in 0.020, HE1103 error generated 0.028, HE1104 error generated 0.027

Keywords: Heat Exchanger, Fouling, Deposit, Pressure Drop

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir ini. Tidak lupa juga penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada keluarga dan para sahabat. Oleh karena dukungan mereka, penulis mampu menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

“PEMODELAN *FOULING* PADA *HEAT EXCHANGER* MENGUNAKAN PERSAMAAN *PHENOMENOLOGICAL NON LINIER*”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Hendra Cordova, ST, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir ini, yang selalu memberikan bimbingan dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Agus M. Hatta, S.T., M.Si, Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Fisika ITS.
3. Segenap Bapak/Ibu dosen pengajar di jurusan Teknik Fisika - ITS.
4. Teman-teman seperjuangan TA yang telah memotivasi dan memberikan bantuan-bantuan dalam penyelesaian laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa karya yang sempurna hanya ada pada Allah SWT. Oleh sebab itu, penulis sangat berterimakasih atas segala masukan, kritik dan saran yang membangun dari pembaca agar laporan ini menjadi lebih baik dari sebelumnya.

Demikian laporan ini penulis buat, semoga laporan ini dapat memberikan manfaat selain bagi penulis sendiri, dan bagi pembaca sekalian.

Surabaya, 31 Juli 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	v
LEMBAR PENGESAHAN	vii
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR	xv
DAFTAR ISI xvii	
DAFTAR GAMBAR	xix
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan2	
1.4 Lingkup Kerja.....	2
1.5 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Heat Exchanger</i>	5
2.2 Hubungan <i>Fouling</i> dengan Koefisien Penukar Panas	7
2.3 Model Fouling	9
2.3.1 Model Teoritis.....	14
2.3.2 Model Empiris.....	15
2.3.3 Model Semi Empiris.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Pengumpulan Data	22
3.2 Pemodelan	22
3.3 Validasi.....	24
3.4 Hasil dan Pembahasan.....	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Analisis Regresi	25
4.2 Validasi Pemodelan <i>Fouling</i>	26
4.3 Perbandingan Model tiap HE	27
4.4 Pembahasan	28
BAB V KESIMPULAN	31
5.1 Kesimpulan.....	31
5.2 Saran	31
DAFTAR PUSTAKA	33

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Aliran fluida pada <i>heat exchanger Parallel-flow</i> dan <i>counter current flow</i>	6
Gambar 2.2 <i>heat exchanger shell and tube</i>	6
Gambar 2.3 Komponen utama <i>shell and tube heat exchanger</i>	7
Gambar 2.4 Jenis kurva <i>fouling</i>	10
Gambar 2.5 Fungsi Boltzman- <i>sigmoidal</i>	12
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	21
Gambar 3.2 Kurva laju aliran <i>fouling</i> eksponensial	23
Gambar 4.1 Regresi Reynolds <i>number</i> HE1104	26
Gambar 4.2 Pemodelan <i>fouling resistance</i>	27
Gambar 4.3 Model eksponensial unit HE1102	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4.4 Model eksponensial unit HE1103	28

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Data Reynolds <i>number</i>	25
Tabel 4.2 Perubahan dari hasil regresi	26
Tabel 4.3 Hasil <i>fitting</i> HE1104	27
Tabel 4.5 Perbandingan hasil <i>fitting</i> tiap HE	29
Tabel 4.6 RMSE tiap HE	29

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Heat exchanger merupakan suatu alat mekanik yang digunakan dalam proses perpindahan panas dua atau lebih fluida yang memiliki temperatur yang berbeda. Perpindahan panas pada *heat exchanger* digunakan untuk mentransfer energi dari fluida bertemperatur panas ke fluida bertemperatur dingin ataupun sebaliknya, tanpa terjadi perpindahan massa didalamnya. Namun, dengan adanya *fouling* pada *heat exchanger* membuat perpindahan panas yang terjadi akan mengalami hambatan.

Permasalahan yang timbul pada suatu industri adalah ketika terjadi *fouling* pada *heat exchanger unit crude distillation* (CDU) adalah masalah yang serius untuk *refineries* (Aminian, 2007). Hal ini dikarenakan terjadinya fenomena yang sangat kompleks yang terdiri atas aktifitas simultan pada mekanisme fisika dan kimia secara umum. Beberapa dari mekanisme yang dialami oleh *heat exchanger* yaitu pembentukan *deposit*, korosi, reaksi kimia *fouling*, sedimentasi dan *bio-fouling* (Bayat, 2012). Pembentukan lapisan *deposit* akan terus berkembang selama *heat exchanger* dioperasikan. Akumulasi *deposit* pada permukaan *heat exchanger* menimbulkan berkurangnya luas permukaan, sehingga mampu menaikkan *pressure drop* dan menurunkan efisiensi perpindahan panas (Bott, 1995).

Adanya *fouling* memiliki dampak negatif maka dibuatlah model matematis *fouling* untuk memprediksi *fouling rate* guna meningkatkan efisiensi *heat exchanger*. Model *fouling rate* pertama kali dideskripsikan berdasarkan konsep dari (Kern dan Seaton, 1959) dimana model dikembangkan berdasarkan *first principal* model berupa *fouling rate* yang merupakan perbedaan antara laju saat *deposit* dan *removal*. Laju aliran *deposit* di deskripsikan dengan model transport reaksi, sedangkan laju *removal* di deskripsikan dengan mass transfer. Selain itu (Epstein, 1994) mempertimbangkan terjadinya *fouling* saat *initial time*, merupakan hal yang sulit untuk membenarkan keterbatasan waktu awal terjadinya *fenomena fouling*.

Model *fouling* juga dikembangkan dengan model empiris berbasis *artificial neural network* (ANN) karena kemampuan yang unggul dalam menangani masalah yang kompleks dan sistem nonlinier. Model *artificial neural network* telah dikembangkan untuk *preheat exchanger* pada unit *crude distillation* berdasarkan data *historical*

(Radhakharishnan, 2007) dan *artificial neural network* model juga dikembangkan berdasarkan data dari tes *ring* skala laboratorium (Aminian dan Shahhosseini, 2008). Kelebihan dari model empiris adalah mampu mendapatkan *fouling rate* dengan mudah dan sesuai dengan bentuk *fouling* yang terjadi pada *plant*, tetapi tidak bisa mendeskripsikan fenomena yang terjadi.

Untuk aliran pipa parameter tak berdimensi yang paling penting adalah bilangan Reynolds, Re adalah perbandingan antara efek inersia dan viskositas dalam aliran. Dari hasil analisa, dapat diketahui bahwa aliran pada pipa tergantung terhadap angka Reynolds (*Reynolds number*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dibahas, maka dapat diambil rumusan masalah yaitu bagaimana menurunkan sebuah model non linier supaya mampu menggambarkan karakteristik suatu *fouling* dan memahami fenomena yang terjadi.

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini yaitu:

Mengembangkan suatu model non linier supaya mampu menggambarkan karakteristik suatu *fouling* dan memahami fenomena yang terjadi.

1.4 Lingkup Kerja

Hal-hal yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

1. Data sekunder yang diambil meliputi data Reynold *number* dan temperatur.
2. Data diperoleh dari jurnal
3. Pemodelan *fouling* menggunakan persamaan Polley.
4. Pemodelan dilakukan pada *heat exchanger* tipe *shell and tube*

1.5 Sistematika Penulisan

Laporan penelitian Tugas Akhir ini disusun secara sistematis dengan perincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi tentang penjelasan latar belakang permasalahan, ruang lingkup kerja, tujuan, dan sistematika laporan tugas akhir ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori-teori yang meliputi *heat exchanger* dan jenisnya serta model *fouling* dari hasil pemodelan sebelum nya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah – langkah yang dilakukan dalam penelitian.

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi analisa hasil dan pembahasan yang didapat selama melakukan penelitian.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil penelitian yang telah dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Daftar pustaka dari semua referensi yang digunakan dalam penyusunan penelitian.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

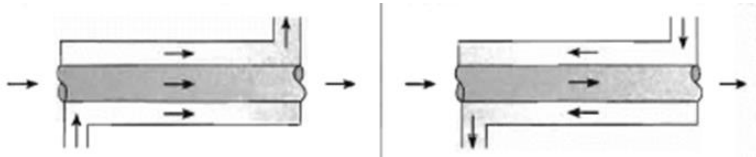
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Heat Exchanger*

Heat exchanger adalah suatu alat mekanik yang digunakan dalam proses perpindahan panas dua atau lebih fluida yang memiliki temperatur yang berbeda. Perpindahan panas pada *heat exchanger* digunakan untuk mentransfer energi dari fluida bertemperatur panas ke fluida bertemperatur dingin ataupun sebaliknya, tanpa terjadi perpindahan massa didalamnya. Perpindahan panas pada *heat exchanger* dapat terjadi melalui proses konveksi, konduksi dan radiasi (ivanov,2010). Laju perpindahan panas pada *heat exchanger* dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas keseluruhan, luas bidang transfer, dan perbedaan temperatur rata-rata logaritmik (Mostafa,2002).

Selain untuk mentransfer energi, perpindahan panas juga digunakan untuk mengubah keadaan atau fase suatu fluida, serta menghemat energi pada proses selanjutnya. Pada *heat exchanger* fluida-fluida dipisahkan oleh elemen konduksi berupa pembatas atau dinding berbentuk tabung atau lempengan sehingga tidak terjadi kontak langsung atau pencampuran fluida-fluida tersebut.

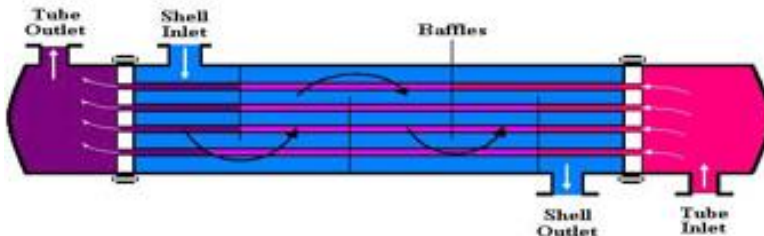
Gambar 2.1 merupakan contoh *heat exchanger* dengan konstruksi aliran yang berlawanan atau dengan arah aliran yang searah *concentric tube* dan *double pipe*. Pada *pararel-flow*, aliran fluida panas masuk searah dengan aliran fluida dingin yang akan dipanaskan. Desain ini sangat menguntungkan ketika kedua jenis fluida dibawa pada temperatur yang sama. Sedangkan untuk *counterflow*, pemanasan *fluida* terjadi dengan aliran *fluida* pemanas yang berlawanan arah dengan *fluida* yang akan dipanaskan (Kothari dan Subbarao, 2009). *Counterflow* memiliki tiga keuntungan dibandingkan dengan *pararel-flow* yaitu perbedaan suhu yang lebih seragam antara *fluida* yang dipanaskan dan *fluida* pemanasnya dengan meminimalkan tegangan *thermal* di *heat exchanger*, suhu *outlet fluida* yang dipanaskan dapat mendekati suhu *fluida* pemanas, dan perbedaan suhu yang lebih seragam akan membuat perpindahan panas pada *heat exchanger* lebih stabil. Adapun bagian-bagian dari *heat exchanger* antara lain:



Gambar 2.1 Aliran fluida pada *heat exchanger* *Parallel-flow* dan *Counter current flow*

a. *Shell dan Tube Heat Exchanger*

Shell and Tube Heat exchanger adalah salah satu jenis *heat exchanger* yang biasanya digunakan oleh perusahaan industri seperti minyak dan gas karena *heat exchanger* ini dapat bekerja pada kondisi tekanan relatif tinggi (lebih besar dari 30 bar), memiliki permukaan perpindahan panas per satuan volume yang lebih besar dan lebih mudah dalam proses pembersihan. *Shell and tube heat exchanger* terdiri dari sebuah *shell* yang di dalamnya disusun *tube* dengan rangkaian tertentu untuk mendapatkan luas permukaan yang optimal. Fluida mengalir di *shell* maupun di *tube* sehingga terjadi perpindahan panas antara fluida dengan dinding *tube* sebagai perantara. Berikut adalah skema *shell and tube heat exchanger*.



Gambar 2.2 Heat Exchanger shell and Tube

Komponen utama dari *shell and tube heat exchanger* adalah sebagai berikut :

a. *Tube*

Berbentuk pipa silinder sebagai media mengalirnya fluida yang akan ditukar panasnya sekaligus sebagai pemisah antara fluida di dalam *tube* dengan fluida di dalam *shell*. Kumpulan dari beberapa *tube* diikat oleh *tube bundle*.

b. *Baffle*

Sekat yang berfungsi untuk menahan struktur tube bundle, mencegah terjadinya getaran pada tube, serta mengatur aliran fluida dalam shell sehingga diperoleh turbulensi yang tinggi.

c. *Shell*

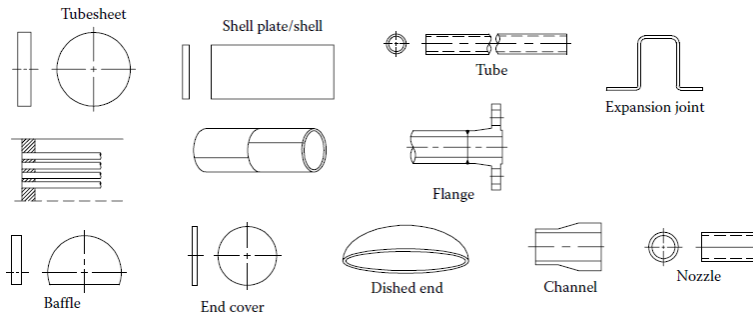
Merupakan selubung yang menyelimuti bagian dalam heat exchanger sekaligus sebagai rumah dari *tube bundle*, media mengalirnya fluida yang akan ditukar panasnya serta untuk menahan beban berat, temperatur dan tekanan fluida.

d. *Front head*

Bagian depan *heat exchanger* yang berfungsi untuk mencegah terjadinya losses serta tempat mengalirnya fluida.

e. *Rear head*

Bagian belakang *heat exchanger*.



Gambar 2.3 Komponen utama *shell and tube heat exchanger*

2.2 Hubungan *Fouling* dengan Koefisien Penukar Panas

Fouling merupakan pembentukan lapisan *deposit* pada permukaan perpindahan panas (T.R.Bott, 1995). *Fouling* pada permukaan perpindahan panas akan menyebabkan kemampuan operasional dari alat penukar panas menjadi berkurang. Hal ini dikarenakan meningkatnya penurunan tekanan yang dibutuhkan untuk mempertahankan laju aliran melalui element penukar. Laju perpindahan panas antara fluida di dalam tabung dan permukaan di *film fouling* dapat diberikan dengan persamaan berikut;

$$Q = A h (T_f - T_s) \quad (2.1)$$

Faktor *fouling* (R_f) didefinisikan dari segi fluks panas (Q/A) dan perbedaan suhu diseluruh *fouling* (ΔT_f) dengan persamaan sebagai berikut;

$$R_f = \frac{\Delta T_f}{A} Q \quad (2.2)$$

Sehingga hubungan koefesien perpindahan panas keseluruhan dan *fouling* bisa ditulis menggunakan persamaan sebagai berikut ;

$$\frac{1}{U_a} = \frac{1}{U_o} + R_f \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{U_a} = \frac{d_o}{d_i h_i} + \frac{d_o R_{f,i}}{d_i} + \frac{d_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2k_w} + R_{f,o} + \frac{1}{h_o} \quad (2.4)$$

Keterangan:

$R_{f,i}$ = Resistansi *Fouling* bagian dalam

$R_{f,o}$ = Resistansi *Fouling* bagian luar

h_i = Koefisien perpindahan panas *tube-side film*

h_o = Koefisien perpindahan panas *shell-side film*

U_a = Koefisien perpindahan panas keseluruhan

k_w = Konduktifitas panas dari dinding *tube*

d_o = Diameter terluar dari *tube*

d_i = Diameter dalam dari *tube*

Sehingga dengan menggunakan persamaan (2.1 – 2.4), dapat dihitung temperatur keluaran dari penukar panas sebagai berikut ;

$$\begin{aligned} T_{c,o} &= \left[\frac{k_1(\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - 1)}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{h,i} \\ &+ \left[\frac{(1-k_1) \exp(-k_2 F(k_1 - 1))}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{c,i} \\ T_{h,o} &= \left[\frac{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - 1}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{c,i} \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$+ \left[\frac{(k_1 - 1)}{\exp(-k_2 F(k_1 - 1)) - k_1} \right] T_{h,i} \quad (2.6)$$

Nilai dari k_1 dan k_2 dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut

$$k_1 = \frac{m_h c_{p,h}}{m_c c_{p,c}} \quad (2.7)$$

$$k_2 = \frac{UA}{m_h c_{p,h}} \quad (2.8)$$

2.3 Model Fouling

Fouling merupakan suatu *phenomena* yang terjadi saat waktu *initial time* (t_0) hingga waktu tak hingga (t_∞). Untuk mengetahui *phenomena* yang terjadi dibutuhkan adanya model matematis yang mampu mendeskripsikan karakteristik tingkah laku *fouling* yang pada *heat exchanger*. Secara umum model matematis yang mendeskripsikan *crude oil fouling* pada *heat exchanger* yang diusulkan dan sampai saat ini masih dikembangkan terdiri dari 3 (tiga), yaitu: model teoritis, semi empiris dan empiris (Ramasamy, 2014). Model teoritis dan semi empiris mempertimbangkan *first principal model* sedangkan berbeda dengan model empiris yang menghilangkan *phenomena fouling* yang terjadi (Deshannavar, 2010).

Pertama kali model *fouling* dideskripsikan berdasarkan konsep empiris (Kern dan Seaton, 1959) dimana *fouling rate* merupakan perbedaan antara laju saat *deposition* (m_d) dan laju saat *removal* (m_r), yang ditunjukkan pada persamaan 2.3 berikut ini :

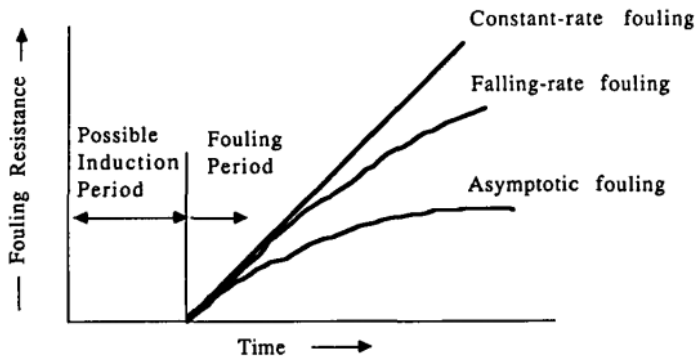
$$\frac{dR_f}{dt} = m_d - m_r \quad (2.9)$$

Kern dan Seaton (1959) mengasumsikan bahwa laju saat *removal* (m_r) menjadi *proportional* untuk *fouling resistance* (R_f) dan menghasilkan *asymptotic (non-zero) fouling resistance* yang digunakan untuk mendeskripsikan *fouling* selanjutnya/prediksi. Sehingga diperoleh persamaan yaitu :

$$R_{ft} = R_{f\infty}(1 - e^{-\beta t}) \quad (2.10)$$

Dimana R_{ft} merupakan *thermal fouling resistance* saat waktu t , R_{∞} adalah *thermal fouling resistance* saat waktu *infinite* (nilai *asymptotic*) dan β berupa konstanta yang nilainya bergantung pada properti sistem.

Prinsip dan cara kerja *fouling* berubah-ubah dipengaruhi oleh disain *heat exchanger*, kondisi operasi dan kandungan *crude oil*. Sehingga pada karakteristik *fouling* yang berbeda menyebabkan perbedaan pula dengan disain *heat exchanger*. Secara umum, model linier, *falling rate* dan *asymptotic fouling* digunakan sebagai karakteristik yang berhubungan dengan tingkah laku *fouling* pada industri *heat exchanger* (Sayane S, 2007) seperti ditunjukkan pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Jenis kurva *fouling*

Model *fouling* yang paling simple yaitu model linier, dimana model ini *exclude* periode induksi dan *asymptotic* seperti pada kurva A dan mempunyai bentuk matematis seperti persamaan 2.11 dengan a merupakan konstanta linier dari *fouling rate*.

$$R_f(t) = at \quad (2.11)$$

Dengan asumsi *fouling rate* merupakan propotional untuk suatu *driving force* seperti *heat flux*, Epstein (1998) menunjukkan analisis matematika pada *falling rate* pada kurva B. model matematika dengan mengabaikan periode awal yaitu,

$$R_f(t) = a \cdot \ln(t) - b \quad (2.12)$$

Satu model yang paling simple untuk mendeskripsikan tingkah laku *fouling* seperti dikatakan oleh Kern dan Seaton (1959) adalah model yang menginterpretasikan matematika pada model *asymptotic* seperti ditunjukkan pada kurva C, sehingga model ini juga mengabaikan periode awal. Rumus matematika dari model ini adalah,

$$R_f(t) = a(1 - e^{-bt}) \quad (2.13)$$

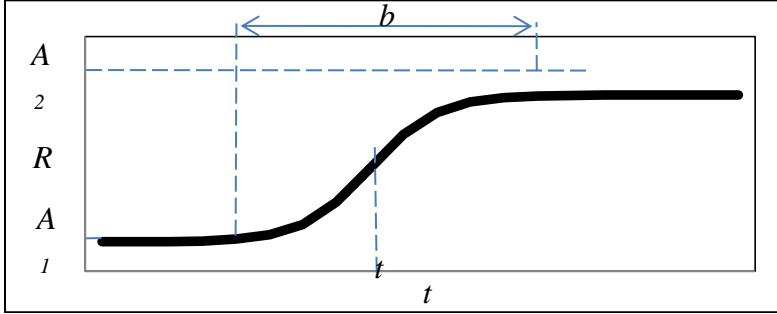
Perbedaan model *fouling* digunakan untuk mendeskripsikan tingkah laku *fouling* pada *heat exchanger* yang berbeda. Hal ini diamati dari karakteristik *fouling* pada individu *heat exchanger* yang memiliki perubahan *trend fouling* setelah *cleaning*. Oleh karena itu seleksi dari tipe model *fouling* untuk *heat exchanger* tidak bisa menggambarkan tingkah laku *fouling* pada keseluruhan waktu. Hal ini juga tidak memungkinkan untuk verifikasi secara tepat dari tipe model setiap waktu *heat exchanger* dibawah kondisi *clean*. Bagaimanapun model empiris diatas tidak bisa dimasukkan pada periode *initiation* atau *induction*. Adapun kekurangan yang harus ditutupi pada model *single* yang mana bisa mendiskripsikan karakteristik *fouling* pada tipe yang berbeda dan mampu memasukkan periode *induction* dengan baik.

Untuk mengamati bentuk karakteristik *fouling heat exchanger*, penampakan model *fouling* lebih tertutup menggunakan kurva sigmoidal, sehingga fungsi Boltzman-*sigmoidal* merupakan tipe yang mampu memenuhi kekurangan. Seperti yang ditunjukkan pada persamaan 2.14 berikut:

$$R_f(t) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{\left(\frac{t - t_0}{b}\right)}} \quad (2.14)$$

Fungsi Boltzman-*sigmoid* memiliki empat parameter yaitu A_1 merupakan *asymptote horizon* kiri yang berupa nilai initial, A_2 adalah *asymptote horizon* kanan yang berupa nilai final, t_0 merupakan titik pusat dari infleksi dan b berupa lebar. Fungsi ini bisa menjadi model dari karakteristik *fouling* dengan mengubah nilai dari empat parameter. Parameter menyesuaikan dengan kurva *fitting* seperti deviasi antara data *fouling* dan nilai prediksi yang minimal dengan standart konvergensi 0.0001 hingga 100 iterasi. Standart minimum menyesuaikan nilai deviasi dari variabel yang ingin dicari menggunakan algoritma Newton.

Grafik yang menggambarkan fungsi Boltzman-sigmoidal ditunjukkan pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Fungsi Boltzman-sigmoidal

Penurunan nilai t_0 akan menghilangkan periode *initial* (menjadi kurva *asymptotic*) dan meningkatkan nilai b yang akan membuat kurva menjadi linear. Deskripsi ini menggunakan persamaan 2.13 dan pada kenyataannya t_0 sangat kecil dan $e^{t/b} \gg 1$, kemudian

$$R_f(t) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t/b)}} \approx A_2 + \frac{A_1 - A_2}{e^{(t/b)}}$$

$$R_f(t) = A_2 + A_1 e^{-(t/b)} - A_2 e^{-(t/b)} \quad (2.15)$$

Ketika *initial fouling* sangat rendah, $A_1=0$, maka Boltzman sigmoid menjadi fungsi eksponensial.

$$R_f(t) = A_2 - A_2 e^{-(t/b)} = A_2 (1 - e^{-(t/b)}) \quad (2.16)$$

Pada kasus yang lain, jika nilai b terlalu besar maka fungsi sigmoid bisa menjadi bentuk

$$R_f(t) = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + e^{(t-t_0)/b}} = A_2 + \frac{A_1 - A_2}{1 + \left[1 + \left(\frac{t-t_0}{b} \right) + \frac{1}{2!} \left(\frac{t-t_0}{b} \right)^2 + \dots \right]} \quad (2.17)$$

$$R_f(t) = A_2 + \frac{B}{2 + \left(\frac{t-t_0}{b} \right)} = A_2 + \frac{B}{2 + \frac{t-t_0}{b}} = A_2 + \frac{B}{c + \frac{t}{b}} = A_2 + \frac{B}{c \left(1 + \frac{t}{c_b} \right)}$$

$$R_f(t) = A_2 + \frac{B}{c} \frac{1}{(1+kt)} \quad (2.18)$$

Dimana $B=A_1-A_2$, $C=2-t_0/b$, $k=1/Cb$

Dengan menggunakan *geometric series*, $z=kt$, yaitu

$$\frac{1}{1+z} = 1 + z + z^2 + \dots$$

$$\frac{1}{1+(-z)} = 1 + (-z) + (-z)^2 + \dots$$

Maka persamaan menjadi

$$R_f(t) = A_2 + \frac{B}{C} [1 - kt + (-kt)^2 + \dots]$$

$$R_f(t) = A_2 + \frac{B}{C} [1 - kt] = A_2 + \frac{B}{C} - \frac{Bkt}{C}$$

Sehingga didapatkan persamaan berupa

$$R_f(t) = at + c \quad (2.19)$$

Dimana $a = -Bk/C$ dan $c = A_2 + B/C$

Fungsi Boltzman-*sigmoidal* mampu menggabungkan tiga tipe pada model empiris yang sebelumnya, yaitu linier, *falling rate* dan *asymptotic* dengan memilih parameter yang tepat. Sebagai contoh, untuk nilai t_0 yang sangat rendah mengindikasikan tidak ada atau periode induksi yang rendah, besarnya nilai b dan A_2 mengindikasikan tipe model *fouling* linier, sedangkan untuk b dan A_2 yang sedang mengindikasikan tipe model *fouling asymptotic*.

Alasan terbesar ketika mengembangkan model *fouling* menjadi sangat sulit pada pengembangan model *asymptotic* sebagai *true value* dari a tidak bisa ditentukan dengan data operasional untuk periode terpendek pada operasi tanpa *cleaning*. Satu keuntungan dari penelitian ini yaitu ketersediaan data operasional untuk periode cukup panjang untuk menentukan nilai *asymptotic* dari *fouling resistance* pada sebagian besar *heat exchanger*.

2.2.1 Model Teoritis

Pada tahun 1979, (Critten dan Kolaczowski) menjadikan percobaan *systematic* untuk menentukan *styrene deposition* dari *kerosene* dan mengusulkan model umum yang mempertimbangkan *transport of fouling precursors* dan reaksi kimia. (Critten dan Kolaczowski, 1987) juga mengusulkan untuk memodifikasi model *fouling* untuk menentukan bentuk *polystyrene deposition* dari solusi *dilute styrene* pada *kerosene* sebagai persamaan berikut:

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{1}{\rho_f k_f} \left[\frac{C_{rb}}{\frac{\rho(d-2x)^{1.8}(Sc_r)^{0.67}}{1.213\lambda_1\eta^{0.2}G^{0.8}} + \frac{1}{\frac{-E}{AeRT}}} - \frac{1.213\lambda_1\eta^{0.2}G^{0.8}C_{Di}}{\rho(d-2x)^{1.8}(Sc_r)^{0.67}} \right] \quad (2.20)$$

Persamaan 2.23 merupakan persamaan yang sangat sulit dan komplek untuk digunakan pada analisis operasi sistem atau disain dengan banyak variabel yang tidak diketahui. Selain itu pada model ini berisi *foulant back diffusion term* yang mana merupakan fungsi *deposit* konsentrasi/*foulant* pada *interface solid-liquid* yang sangat sulit untuk ditentukan.

Epstein (1994) mengamati *fouling* untuk membenarkan keterbatasan konsentrasi *foulant* pada permukaan saat *initial time* yang mana membutuhkan terjadinya difusi balik. Selain itu Epstein juga mengembangkan model pada *initial chemical reaction fouling rate* pada permukaan yang merupakan *proportional* untuk *residence time* pada permukaan fluida. Adapun hubungan antara *initial fouling rate* dan massa *flux* adalah.

$$\left[\frac{dR_f}{dt} \right]_{t=0} = \frac{m\phi}{k_f \rho_f} \quad (2.21)$$

Dengan deposisi *massa flux*

$$\phi = \frac{C_b}{\frac{1}{k_m} + \frac{1}{k_r C_s^{n-1}}} \quad (2.22)$$

dimana

$$k_m = \frac{u(f)^{\frac{1}{2}}}{k'Sc^{\frac{2}{3}}}$$

$$k_r = \frac{\mu \exp(-E/RT_{SO})}{k''\rho u^2 f} \quad (2.23)$$

Perbedaan antara konstanta *bulk* (C_b) dan konsentrasi permukaan (C_s) yaitu dengan adanya *driving force* untuk transfer massa *foulant precursor* dari *bulk fluid* ke permukaan *heat exchanger*.

Persamaan 2.26 dihubungkan pada transfer massa denominator pada *foulant* atau *precursor* untuk permukaan *heat exchanger*. *Epstein* model menunjukkan grafik *fitting* yang unggul untuk data *Crittenden* untuk *initial fouling rate* dari *styrene polymerization*. Selain itu, model ini juga mampu menjelaskan efek kecepatan dan temperatur. Disamping itu model ini tidak bisa digunakan untuk mendeskripsikan *fouling* secara umum karena berbagai alasan berikut, orde reaksi ditambah *attachment term* (n), nomor *Schmidt* yang tidak diketahui untuk *fouling*, dan *petroleum* yang mempunyai komposisi kompleks yang membuat hal ini menjadi sulit untuk diisolasi dan merupakan kunci *precursor* untuk *fouling* dan memungkinkan untuk menentukan konsentrasi *foulant precursor* pada *bulk fluid*.

Untuk menyederhanakan model, (Yeap dkk, 2005) menurunkan *Epstein* model pada dimensi parameter A,B dan C untuk kondisi aliran turbulen dengan massa transfer seperti persamaan 2.8 berikut. Dimana v merupakan kecepatan rata-rata *tube side*

$$\frac{dR_f}{dt} = \frac{AC_f v T_s^{2/3} \rho^{2/3} \mu^{-4/3}}{1 + B v^3 C_f^2 \rho^{-1/3} \mu^{-1/3} T_s^{2/3} \exp(\frac{E}{RT_s})} - C v^{0.8} \quad (2.24)$$

2.2.2 Model Empiris

Aplikasi teoritis dan semi empiris *fouling* model untuk analisis *fouling* pada industri *heat exchanger*. Sedangkan pada sisi lain, model *fouling* empiris dibangun berdasarkan data operasi dari *heat exchanger*.

Model empiris menggunakan persamaan tunggal seperti persamaan linier (Smaili F, 2001), *asymptotic*/eksponensial (Sanaye S, 2007) dan *falling rate* (Ishiyama, 2010) untuk mendeskripsikan proses *fouling* atau menggunakan model persamaan multi seperti *Artificial Neural Network* (ANN) (Javad Aminian, 2009).

Model persamaan multi empiris seperti ANN digunakan untuk mengeksklore model *fouling* yang mempunyai hubungan yang kompleks antara input dan output, yang mana pola data yang tersedia sulit untuk menentukan perhitungan. Estimasi online pada ketebalan deposit, keseluruhan koefisien heat transfer dan waktu kritis pada unit yang akan berhenti untuk melakukan pembersihan dengan memanfaatkan ANN (Lalot S, 2006). Membuat jadwal *preventive maintenance* dengan model *fouling* ANN (Radhakrishnan VR, 2007). Membangun model ANN pada industri dengan data eksperimental dan menghasilkan prediksi model ANN terhadap *fouling* ANN yang akurat. Akurasi yang dihasilkan *fouling* ANN sangat tinggi meskipun itu juga mempunyai kekurangan. (Javad Aminian, 2009)

Kerugian terbesar menggunakan model ANN yaitu hanya dispesifikasikan untuk beberapa sistem dan keperluan untuk *training* ulang apabila pemodelan sistem berubah. ANN model merupakan model empiris yang mempertimbangkan efek dari banyak variabel seperti properti *crude oil* dan kondisi operasi *fouling*. ANN memberikan peluang pada model ketika variabel dominan diketahui dan data *satisfactory* digunakan pada model. (Malayeri MR, 2004). Ketidaktersediaan data mampu menghalangi penggunaan model ANN.

Model empiris melibatkan hanya sedikit data yang bisa dibangun dengan mudah menggunakan data operasi. Secara umum, model empiris mampu memprediksi *fouling resistance* sebagai fungsi waktu dan tidak bisa secara langsung bergantung pada properti fisis dari *crude oil*. *Fouling* model linier, *falling rate* dan ekponensial digunakan pada masalah optimasi jadwal pembersihan HEN untuk menurunkan beban komputasi dalam penyelesaian masalah optimasi (Sanaye S, 2007).

Dua model *fouling* empiris yang paling sering digunakan yaitu linier dan ekponensial (Smaili, 2001). Model *fouling* linier ditunjukkan pada persamaan 2.28

$$R_f = at \quad (2.25)$$

Dimana parameter a merupakan konstanta *fouling rate*. Selanjutnya model *fouling* ekponensial ditunjukkan pada persamaan 2.29

$$R_f(t) = R_f^\infty (1 - \exp(-\frac{t}{\tau_t})) \quad (2.26)$$

Nilai dari R_f^∞ dan τ_t merupakan estimasi menggunakan data *historical* dari operasi plant. Model *fouling* eksponensial digunakan untuk evaluasi tingkah laku *fouling* pada HEN *Khorasan Petrochemical plant* yang menghasilkan akurasi prediksi dan temperatur *outlet* (Sanaye S, 2007).

Model *fouling rate* seperti persamaan 2.30 dengan dua parameter model yang digunakan untuk mendeskripsikan *fouling* pada *heat exchanger* (Ishiyama, 2010)

$$R_f(t) = a \cdot \ln(t) - b \quad (2.27)$$

Untuk tujuan optimasi jadwal pembersihan *heat exchanger*, model empiris seperti ekponensial dan linier model *fouling* telah digunakan (Sanaye S, 2007). Pada semi empiris *Panchal* model juga menggunakan untuk optimasi jadwal pembersihan (Ishiyama, 2010). Model *teoritical* seperti Epstein model (Epstein, 1994) tidak bisa digunakan sebagai model prediksi *crude oil* karena banyak konstanta yang tidak diketahui pada persamaan model. Biasanya, hubungan linier, *falling rate* dan eksponensial digunakan sebagai karakteristik pertumbuhan tingkah laku *fouling* pada industri *heat exchanger* (Sanaye S, 2007).

2.2.3 Model Semi Empiris

Konsep utama pada *fouling* pertama kali dipublikasikan pada literatur (Elbert William, 1995) berdasarkan semi empiris model untuk interpretasi kuantitatif data *fouling* pada deposisi dan mekanisme inhibisi. Mekanisme yang pertama kali mengaitkan pada *chemical fouling* yang mampu menaikkan *fouling*. Dan mekanisme yang kedua mempertimbangkan *shear stress* pada permukaan *tube* yang mana dimanipulasikan untuk mengurangi *fouling*.

Korelasi untuk prediksi *linear rate* pada *fouling* membutuhkan kecepatan fluida dan temperatur *film* (Elbert William, 1995) yang ditunjukkan pada persamaan 2.31

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (2.28)$$

Dimana E merupakan energi aktivasi dan Re merupakan kriteria pada fluida yang mengalir dibawah kondisi laminar atau *turbulent* yang dikenal dengan *Reynold number* untuk aliran pipa yang didefinisikan

$$Re = \frac{du\rho}{\eta} \quad (2.29)$$

Dengan R_f merupakan *thermal fouling* resisten pada saat t . sedangkan untuk mendapatkan parameter fisis dengan range yang lebih lebar maka dihasilkan persamaan 2.30 yang dimodifikasi dengan mempertimbangkan $Pr^{0.33}$ (Panchal dkk, 1999). Persamaan hasil modifikasi ditunjukkan pada persamaan 2.31

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^\beta Pr^{-0.33} \exp\left(\frac{-E}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (2.30)$$

Persamaan 2.33 telah dilakukan modifikasi (Polley,2002) dengan parameter sebagai berikut :

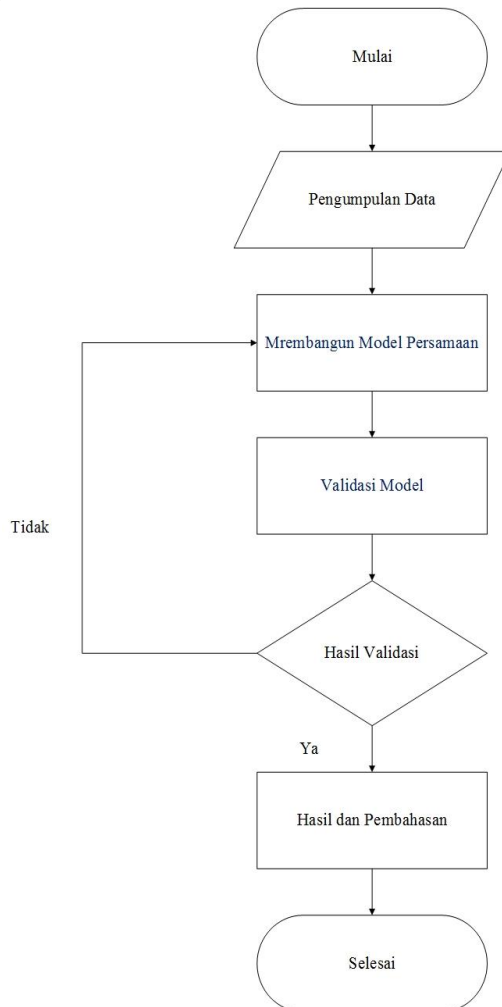
- Temperatur film digantikan dengan temperatur dinding pada tetapan Arrhenius
- Kecepatan yang digunakan $Re^{-0.4}$
- Masa yang hilang diasumsikan proporsional dengan $Re^{-0.4}$

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) - \gamma Re^{0.4} \quad (2.31)$$

Persamaan 2.34 merupakan hasil model yang telah dimodifikasi , dimana model tersebut menjadi model yang mudah dengan hanya mempertimbangkan penghilangan *foulant* apabila terdapat *fluid shear*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Berikut adalah diagram alir mengenai penelitian yang dilakukan, penjelasan mengenai diagram alir ini akan di bahas pada sub bab selanjutnya .



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.1 Pengumpulan Data

Pada tahap ini dilakukan pengumpulan informasi terkait dengan penelitian berupa studi literatur, kemudian dilakukan pengambilan data kondisi operasi pada *heat exchanger* yang meliputi masa, *flow* dan temperatur.

3.2 Pemodelan

Dengan mengacu pada persamaan Polley kita dapat membangun model berbasis persamaan non linier dengan menggunakan variabel Reynolds number (Re), konstanta gas ideal (R) dan temperatur (T).

3.2.1 Penurunan Model *Fouling* Berdasarkan Persamaan Polley

Pada konsep dasar persamaan *fouling* oleh Kern dan Seaton yang mendefinisikan bahwa laju aliran *fouling* berdasarkan pada perbedaan antara massa *fouling* saat *deposite* dengan saat *removal*. Hal ini yang kemudian dijadikan acuan dalam menurunkan persamaan *polley*.

➤ Persamaan Polley

$$\frac{dR_f}{dt} = \alpha Re^{-\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) - \gamma Re^{0,4} \quad (3.1)$$

Ketika laju aliran *fouling* tidak ada pertambahan, $\frac{dR_f}{dt} = 0$

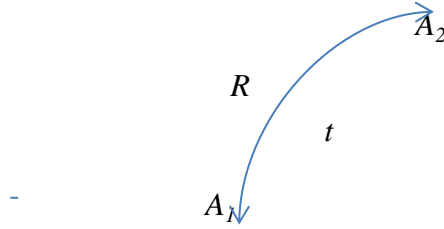
Maka

$$0 = \alpha Re^{-\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) - \gamma Re^{0,4}$$

Sehingga persamaan menjadi

$$\alpha Re^{-\beta} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) = \gamma Re^{0,4} \quad (3.2)$$

Nilai Reynolds saat keadaan (*initial time*) pada Gambar 3.2 menunjukkan A_1 dimana pertumbuhan *fouling* masih sangat kecil. semakin lama pertumbuhan *fouling* akan mengalami pertambahan yang sangat pesat seperti pada keadaan A_2 . Hal ini dikarenakan beberapa faktor yang mempengaruhi yaitu kecepatan, viskositas, dan diameter pipa.



Gambar 3.2 Kurva laju aliran *fouling* eksponensial

Dari Gambar 3.2 Dapat diketahui model *fouling* saat sebelum terjadinya *fouling* sampai saat terjadinya *fouling* hingga waktu yang tak terhingga. Oleh karena itu didapatkan model untuk A_1 dan A_2 sebagai berikut:

$$A_1 = Rf_0 = \alpha Re_1^{-\beta_1} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (3.3)$$

$$A_2 = Rf_{\infty} = \gamma Re_2^{0.4} \quad (3.4)$$

Setelah keadaan A_1 dan A_2 diketahui, maka selanjutnya akan dilakukan proses substitusi terhadap persamaan eksponensial .

3.2.2 Pembentukan Model Eksponensial

Pembentukan model eksponensial laju aliran *fouling* berdasarkan pada perbedaan antara massa *fouling* saat *deposite* dengan saat *removal*. Hal ini yang kemudian dijadikan acuan dalam menurunkan persamaan *polley*.

$$R_f = A_2 - (A_2 - A_1)e^{-\beta_2 t} \quad (3.5)$$

Dimana keadaan A_2 merupakan *deposite*, sedangkan $(A_2 - A_1)e^{-\beta_2 t}$ merupakan keadaan penggerusan/*removal*. Lalu substitusi persamaan 3.4 dan 3.5 ke persamaan 3.6 sehingga di peroleh model sebagai berikut :

$$R_f(t) = \gamma Re_2^{0.4} - (\gamma Re_2^{0.4} - \alpha Re_1^{-\beta_1} \exp\left(\frac{-E}{RT}\right))e^{-\beta_2 t} \quad (3.6)$$

3.3 Validasi

Pada tahap ini dilakukan validasi hasil pemodelan, jika hasil pemodelan sesuai dengan karakteristik plan actual maka hasil pemodelan dapat digunakan. Sebaliknya jika hasil pemodelan tidak sesuai maka akan dilakukan pemodelan dan validasi ulang

Proses *fitting* merupakan proses pengolahan angka untuk mendapatkan nilai yang paling baik terhadap suatu model matematis. Yang mana pada penelitian ini proses fitting digunakan untuk mendapatkan nilai dari konstanta β_2 , γ yang terbaik. Sehingga diharapkan nilai model *fouling resistance* mendekati atau sama dengan *fouling resistance actual* (nilai sebenarnya).

3.4 Hasil dan Pembahasan

Hasil proses yang telah didapatkan kemudian dilakukan analisa. Sehingga diperoleh kesimpulan yang mampu menjawab tujuan dan menyelesaikan masalah yang diangkat dalam topik penelitian. Selanjutnya menyusun laporan sesuai dengan hasil yang telah dikerjakan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab 3 telah membahas tentang penurunan model *fouling* menggunakan persamaan Polley. Proses pengumpulan data dan langkah- langkah penurunan juga telah di bahas pada sub bab 3. Bab ini membahas tentang perhitungan regresi untuk pendekatan nilai Reynolds *number* A_1 dan A_2 , memvalidasi antara R_f pada *plant* dengan R_f hasil pemodelan, serta membandingkan pemodelan beberapa HE.

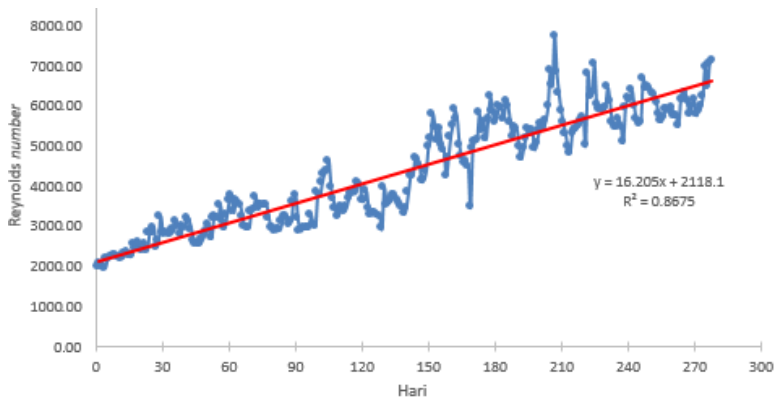
Tabel 4.1 Data Reynolds *number*

Time (Hari)	NRe HE1104
1	1988.3
2	2084.9
3	2035.4
4	1974 .2
5	2195 .8
6	2221 .5
7	2256 .0
8	2271 .1
9	2269 .7
10	2242 .1

Reynolds *number* digunakan untuk menentukan jenis suatu aliran pada pipa. Apakah aliran tersebut laminar ataupun turbulen.

4.1 Analisis Regresi

Untuk mendapatkan hubungan fungsional antara dua variable atau lebih maka dilakukan regresi untuk mempermudah dalam penentuan suatu slop. Pada tugas akhir ini dilakukan suatu regresi untuk mendapatkan data Reynolds *number*.



Gambar 4.1 Regresi Reynolds number HE1104

Dari data regresi Reynolds number di peroleh nilai $Y = 16,205X + 2118,1$ setelah itu substitusikan X yang menyatakan hari ke-(n) pada persamaan Y supaya menghasilkan data regresi .

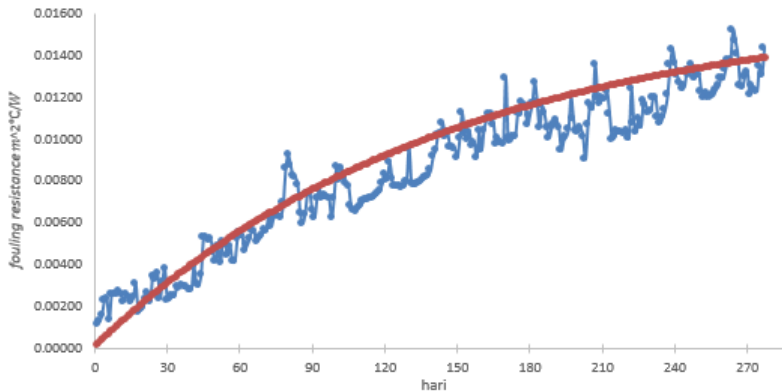
Tabel 4.2 Perubahan dari hasil regresi

Waktu (Hari)	Reynolds number <i>plant</i>	Reynolds number hasil regresi
0	1988,3	2118.1
1	2084,9	2434,2
278	7150,0	6623,0

Dari hasil persamaan regresi dapat menentukan nilai A_1 serta nilai A_2 . A_1 adalah waktu dimana keadaan *fouling* masih sangat awal yaitu di nyatakan dalam waktu hari ke-(n) dimana $n=0$ sedangkan A_2 waktu dimana *fouling* pertumbuhan nya sudah sangat besar dalam penelitian ini yang digunakan adalah hari ke 278.

4.2 Validasi Pemodelan *Fouling*

Validasi dilakukan untuk membuktikan pemodelan pada Persamaan 3.6 sesuai dengan data *fouling resistance* pada *plant* aktual.



Gambar 4.2 model eksponensial HE1104

Dari Gambar 4.2 pemodelan *fouling resistance* dapat diketahui dari kurva yang berwarna biru yang merupakan *fouling resistance* yang ada pada *plant* sedangkan kurva yang berwarna merah adalah grafik model eksponensial dari penurunann persamaan Polley.

hasil pemodelan diperoleh konstanta fitting sebagai berikut :

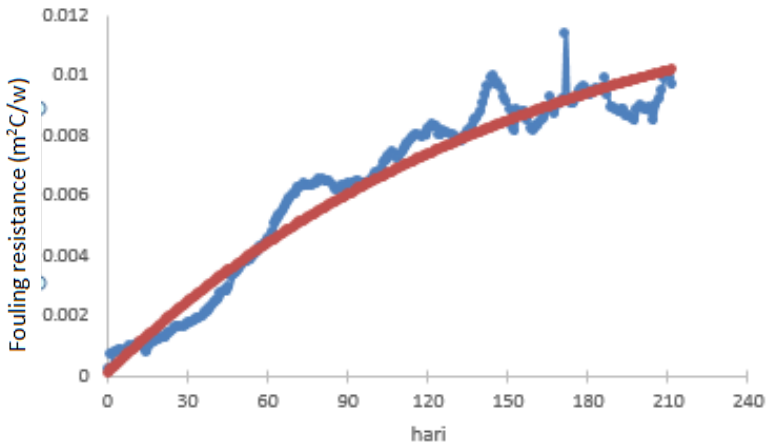
Tabel 4.3 Hasil *fitting* HE1104

β_2	0.0069
γ	0.00048

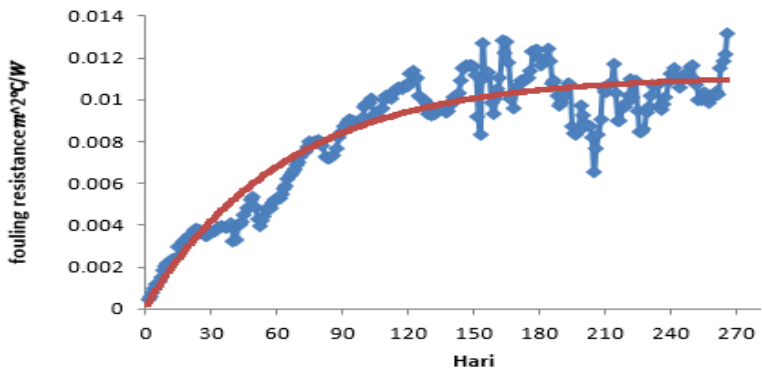
Perubahan nilai β_2 , γ di gunakan untuk menentukan keadaan awal A_1 dengan keadaan A_2 agar sesuai dengan model *fouling resistance* yang ada pada *plant*. Ketika nilai β_2 dan γ diubah maka grafik penurunan model menjauhi fouling resistance actual .

4.3 Perbandingan Model tiap HE

Pada *plant preheat train* unntuk pemanasan *cruide oil* terdapat jaringan penukar panas yang terdiri dari 11 HE . dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan pada unit HE1102, HE1103 serta HE1104.



Gambar 4.3 Model eksponensial HE1102



Gambar 4.4 Model eksponensial HE1103

Tabel 4.4 Perbandingan hasil *fitting* tiap HE

<i>fitting</i>	HE1102	HE1103	HE1104
β_2	0,0063	0.015	0,0069
γ	0,00044	0.00035	0,00048

4.4 Pembahasan

Fouling pada *heat exchanger* merupakan fenomena yang sangat kompleks dimana pertumbuhan *fouling* sangat susah di prediksi selama *heat exchanger* dioperasikan. Akumulasi *deposit* pada permukaan *heat*

exchanger menimbulkan berkurangnya luas permukaan, sehingga mampu menaikkan *pressure drop* dan menurunkan efisiensi perpindahan panas.

Model *fouling* dengan karakteristik eksponensial ditunjukkan pada Persamaan 3.6 yang kemudian dilakukan proses *fitting* dengan nilai acuan dari konstanta β_2 , γ berdasarkan Tabel 4.3. Dimana hasil pemodelan nya mampu menggambarkan karakteristik dari persamaan eksponensial .

Hasil pemodelan eksponensial pada Persamaan 3.6 digunakan untuk memodelkan HE1102 dan HE1103. Hasil yang diperoleh dari *heat exchanger* tersebut mempunyai karakteristik pemodelan yang sama dengan HE1104.

Dengan menggunakan *root mean square* (RMSE) dapat diketahui nilai eror nya. Nilai *error* yang di hasilkan pada pemodelan beberapa unit *heat exchanger* ini sebagai berikut:

Tabel 4.5 RMSE tiap HE

HE1102	HE1103	HE1104
0.020	0.028	0.027

Nilai *error* digunakan untuk mengetahui keakuratan model. Tabel 4.6 merupakan nilai *error* yang di hasilkan oleh pemodelan HE .

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini yaitu

1. Reynold *number* berpengaruh terhadap laju aliran *fouling* pada pipa. Semakin besar nilai *Re* maka *fouling* yang terdapat pada pipa semakin besar. sehingga menyebabkan diameter dalam pipa mengecil dan laju kecepatan aliran semakin cepat.
2. Untuk mencocokkan model variable yang berpengaruh pada pemodelan *heat exchanger* yaitu β_2 , γ dimana pada saat nilai tersebut di rubah maka hasil dari pemodelan eksponensial menjauhi model *fouling resistance* pada *plant*.
3. Untuk menghitung *error* digunakan RMSE. Nilai *error* yang dihasilkan pada pemodelan *heat exchanger* pada HE1102 *error* yang di hasilkan sebesar 0.020 .pada HE1103 *error* yang di hasilkan 0.0286 . Pada HE1104 *error* yang di hasilkan 0.0272 .

5.2 Saran

Hal yang dapat penulis sarankan dalam penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan pemodelan *fouling* pada sisi *shell* karena pada penelitian pada tugas akhir pemodelan *fouling* dihitung pada sisi tube .

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ivanov .V.L. 2010. ***“Heat Exchangers”***. Power engineering Departement, Moscow Sate Technical University, Moscow,Rusia.
- [2] Biyanto Totok R, Ramasamy M. 2012. ***“An approximate integral model with an artificial neural network for heat exchangers”***. Chemical Engineering Departement, University Teknologi Petronas Malaysia.
- [3] Mostafa M. Awad. 2002. ***“Fouling Of Heat Transfer Surfaces”***. Faculty of Engineering, Mech. Power Eng.Dept, Mansoura University.
- [4] T.R Bott, ***“Fouling of Heat Exchanger”***. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 1995.
- [5] Biyanto Totok R, Ramasamy M. 2012. ***“An approximate integral model with an artificial neural network for heat exchangers”***. Chemical Engineering Departement, University Teknologi Petronas Malaysia.
- [6] Urbaniec K and Markowski M., 2005. ***“Optimal Cleaning Schedule For Heat Exchangers in a Heat Exchanger Network”***. Departement of Process Equipment, Warsaw University of technology, Poland.
- [7] Pogiatzis T, Vassiliadis.V.S, Wilson D.I. 2011. ***“An MINLP Formulation for Scheduling the Cleaning of Heat Exchanger Networks Subject To Fouling and Ageing”***. Departement of Chemical Engineering & Biotechnology, University of Cambridge.
- [8] Silva A.P, Biscaia E.C, Ravagnani M.A.S.S. 2005. ***“Heuristic Optimization Of Heat Exchangers Networks”***. Departement de Engenharia Quimica, Estadual de Maringa university.
- [9] ESDU.2000. ***“Heat exchanger fouling in the preheat train of a crude oil distillation unit”***. ESDU, London.
- [10] J. Aminian and S. Shahhosseini, ***“Evaluation of ANN modeling for prediction of crude oil fouling behavior,” Applied Thermal Engineering***, vol. 28, pp. 668-674, 2008.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”